

文章编号 1004-924X(2009)05-1026-07

# 嵌入式虚拟动态信号分析仪的设计

熊 皑,范永坤,吴钦章

(中国科学院 光电技术研究所,四川 成都 610209)

**摘要:**为了给远程化控制的光电跟踪系统提供抗恶劣环境的设计工具,设计了一种嵌入式虚拟动态信号分析仪并对该系统采用的系统辨识等算法进行了研究。基于某型号光电跟踪系统平台,结合虚拟仪器概念和嵌入式技术,建立了嵌入式虚拟动态信号分析仪的系统架构,设计了仪器系统架构中各层软件。利用该仪器测试了实际运行中的光电跟踪系统速度回路和电流回路,实验结果表明光电跟踪系统满足设计要求,电流回路带宽为 266.05 Hz,速度回路带宽为 20.3 Hz,虚拟仪器具有较好的精确度和实用性,满足了光电跟踪系统设计工具准确、方便、快捷等要求,提高了光电跟踪系统设计水平和设计效率。

**关键词:**光电跟踪系统;虚拟仪器;系统辨识;离散傅里叶变换

**中图分类号:** TN911.6; TP273 **文献标识码:** A

## Design of embedded virtual dynamical signal analyzer

XIONG Ai, FAN Yong-kun, WU Qin-zhang

(*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

**Abstract:** In order to provide a design tool for the photoelectronic tracking systems in remote controls, an embedded virtual dynamical signal analyzer is established, and its applied algorithms such as system identification are investigated. Based on the platform of a photoelectronic tracking system and combining the concept of a virtual device with the embedded technology, an idea for an Embedded Virtual Dynamical Signal Analyzer (EVDSA) is presented and the system infrastructure is established. Three layers of softwares for the system infrastructure is designed respectively and the application layer based on the system identification technology is introduced especially. The current loop and the speed loop of the photoelectronic tracking system are tested by the EVDSA and the experimental results show that the photoelectronic tracking system meets the design demands for the bandwidths of a current loop of 266.05 Hz and a speed loop of 20.3 Hz. The virtual device has good accuracy and practicability, which can satisfy the design tool requirements of precise, convenient and rapid speed design levels and can improve the efficiency of the photoelectronic tracking system.

**Key words:** photoelectronic tracking system; virtual device; system identification; Discrete-time Fourier Transform (DFT)

## 1 引言

动态信号分析仪在光电跟踪控制系统的分析、设计和维修中起着重要的作用<sup>[1]</sup>。随着光电跟踪系统网络化远程控制的广泛应用,传统动态信号分析仪在位于恶劣自然环境中的光电跟踪系统中的使用变得非常不方便。虚拟仪器是一种基于计算机的自动化测试系统,采用计算机开放体系结构取代传统的单机测试仪器,处理、显示和存储各种类型的数据;同时还结合了网络技术,实现了远程数据通信,实时传输测量数据给用户<sup>[2]</sup>。本文基于某型号光电跟踪系统,结合动态信号分析仪基本原理和虚拟仪器技术,设计了一种嵌入式虚拟动态信号分析仪,可以为设计研究人员提供一种新型的辅助设计工具。

## 2 系统架构

基于某型号光电跟踪系统平台,图1给出了嵌入式虚拟动态信号分析仪的系统架构图,它包括应用层、代理层和驱动层。

应用层软件具有友好用户操作界面,能实现激励信号的生成、数据处理、显示以及曲线拟合等功能。应用层采用事件驱动方式运动,接收来自系统硬件的全局固定频率 $f_{\text{appl}}$ 的中断信号,将应用层数据发送到代理层,并以同样频率接收来自代理层的数据。

代理层一方面需要将来自应用层和驱动层的数据进行前期处理,另外一方面还需要按照全局固定频率分别和应用层及驱动层进行数据交互。驱动层软件所处理的数据不只是来自伺服驱动方面的,对于光电跟踪系统,它还需要处理图像方面的信息,因为虚拟仪器代理层的软件只是光电跟踪系统代理层的其中一部分。

驱动层的伺服控制部分被分为位置、速度和电流三环回路。它和代理层的数据交互是按照全局固定频率 $f_{\text{appl}}$ 进行的,而其位置和速度回路则是按照 $8f_{\text{appl}}$ 的频率进行处理,电流回路则是按照 $80f_{\text{appl}}$ 的频率来运行的,并在每个电流回路驱动电机的转动,同时采集其电流反馈信号,而编码器的反馈信号则是按照 $8f_{\text{appl}}$ 的频率进行采集。

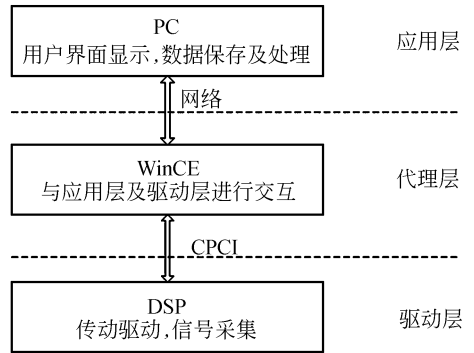


图1 嵌入式虚拟动态信号分析仪系统架构图  
Fig. 1 Diagram of frame of embedded virtual dynamical signal analyzer(EVDSA)

## 3 软件设计

软件是构成嵌入式虚拟动态信号分析仪的重要组成部分,在不改变原有光电跟踪系统软件系统结构的情况下,只在每层原有软件基础上添加新的功能模块,从而实现虚拟仪器的功能,而其中应用层软件的设计最为关键。

### 3.1 应用层软件

应用层软件运行在 Windows XP 操作系统平台上,采用了 Visual C++ 6.0 开发工具编写。图2给出了应用层软件流程图,同时根据系统辨识原理<sup>[3]</sup>,该软件可分为4个子模块:信号设计、数据处理、曲线拟合以及校验与评估<sup>[4]</sup>。

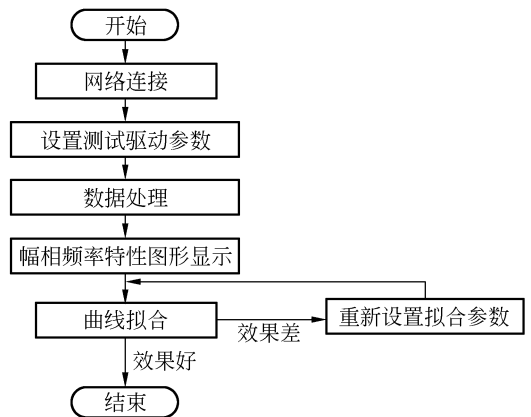


图2 应用层软件流程图

Fig. 2 Flow diagram of application layer software

#### 3.1.1 信号设计

虚拟仪器的驱动信号必须保证能够完全激励

被控对象,且保持被控对象稳定。常用驱动信号有二进制信号、方波信号、扫频信号和伪信号等几种<sup>[5]</sup>。其中,扫频正弦信号是一组频率渐增(或渐减)的连续正弦信号,因为其频率变化可分别按线性或对数方式进行,所以更适合光电跟踪控制系统<sup>[6]</sup>。

通过用户设定测试信号的幅值、扫频模式(对数或线性)、起始频率、停止频率、扫频点数等参数,从而生成驱动信号数组。假定系统采样频率为  $f_s$ ,当前扫频正弦波频率为  $f$ ,则要生成一个完整周期正弦波所需要的驱动数据数量为  $\text{Num} = f_s/f$ 。为了保证驱动信号频率在增加(或减少)的过程中由于频率变换导致驱动效果不理想,可以使每个频率下的正弦波运行  $P$  个周期,此时驱动信号数组的长度为  $P \cdot \text{Num}$ 。

### 3.1.2 数据处理

通过驱动信号激励被控对象,则相应能够得到系统的反馈信号。被测系统一般可假设为线性时不变(LTI)系统,因此使用确定频率范围的扫描正弦信号激励被测系统,就可以获得其频响特性。分别对驱动信号和响应信号进行离散傅里叶变换(DFT)处理,然后将得到的幅值相除,相角相减,就可以得到对象频响曲线<sup>[7]</sup>。在处理相位时,需注意 3 个问题:小幅值信号、被零除错误和极点模糊<sup>[8]</sup>。

### 3.1.3 曲线拟合

频响特性曲线是一种采用非参数模型表示被控对象的方式,通过拟合频响曲线得到被控对象的传递函数,则是以参数模型方式表示被控对象<sup>[9]</sup>。Levy 法是频域内基于线性最小二乘原理

的拟合算法,通过将被动系统传递函数表示为有理分式,再结合实测的频响数据序列拟合被测对象传递函数<sup>[10]</sup>。

假设被控对象传递函数的理论值为  $G(j\omega)$ ,则:

$$G(j\omega) = \frac{A_0 + A_1(j\omega) + A_2(j\omega)^2 + \dots + A_m(j\omega)^m}{1 + B_1(j\omega) + B_2(j\omega)^2 + \dots + B_n(j\omega)^n} = \frac{(A_0 - A_2\omega^2 + A_4\omega^4 - \dots) + j\omega(A_1 - A_3\omega^2 + A_5\omega^4 + \dots)}{(1 - B_2\omega^2 + B_4\omega^4 - \dots) + j\omega(B_1 - B_3\omega^2 + B_5\omega^4 + \dots)} = \frac{N(j\omega)}{D(j\omega)}, \quad (1)$$

假设  $\tilde{G}(j\omega)$  为实测数据,在每个拟合频率点  $\omega_k (k=0, 1, \dots, P)$  上,则有:

$$\tilde{G}(j\omega) = \text{Re}(\omega_k) + j\text{Im}(\omega_k). \quad (2)$$

理论值  $G(j\omega)$  和实测数据  $\tilde{G}(j\omega)$  在每个拟合频率点上相减即为在该频率上的拟合误差:

$$\varepsilon_k = \tilde{G}(j\omega) - G(j\omega) = \tilde{G}(j\omega) - \frac{N(j\omega_k)}{D(j\omega_k)}. \quad (3)$$

为了避免误差平方和  $J^* = \sum_{k=0}^p |\varepsilon_k|^2$  对  $\varepsilon_k$  求偏导时产生非线性表达式,将  $D(j\omega)$  作为  $\varepsilon_k$  的加权,定义新的误差函数:

$$e_k = \varepsilon_k D(j\omega_k) = \tilde{G}(j\omega_k) D(j\omega_k) - N(j\omega_k), \quad (4)$$

则新的误差平方和为  $J = \sum_{k=0}^p |e_k|^2$ 。  $J$  分别对  $\mathbf{X} = [A_0 \ A_1 \ A_2 \ \dots \ \vdots \ B_0 \ B_1 \ B_2 \ \dots]^T$  的每一未知元素求偏导,并使  $\partial J / \partial \mathbf{X} = 0$ ,从而导出 Levy 法的矩阵方程:

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{N}, \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{N} = [S_0 \ T_1 \ S_2 \ \dots \ \vdots \ 0 \ Q_2 \ 0 \ \dots]^T$ ,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \gamma_0 & 0 & -\gamma_2 & 0 & \gamma_4 & \dots & T_1 & S_2 & -T_3 & -S_4 & T_5 & \dots \\ 0 & \gamma_2 & 0 & -\gamma_4 & 0 & \dots & -S_2 & T_3 & S_4 & -T_5 & -S_6 & \dots \\ \gamma_2 & 0 & -\gamma_4 & 0 & \gamma_6 & \dots & T_3 & S_4 & -T_5 & -S_6 & T_7 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_1 & -S_2 & -T_3 & S_4 & T_5 & \dots & Q_2 & 0 & -Q_4 & 0 & Q_6 & \dots \\ S_2 & T_3 & -S_4 & -T_5 & S_6 & \dots & 0 & Q_4 & 0 & -Q_6 & 0 & \dots \\ T_3 & -S_4 & -T_5 & S_6 & T_7 & \dots & Q_4 & 0 & -Q_6 & 0 & Q_8 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix},$$

$$\gamma_i = \sum_{k=0}^p \omega_k^i, S_i = \sum_{k=0}^p \omega_k^i \text{Re}(\omega_k), T_i = \sum_{k=0}^p \omega_k^i \text{Im}(\omega_k), Q_i = \sum_{k=0}^p \omega_k^i (\text{Re}^2(\omega_k) + \text{Im}^2(\omega_k)).$$

如果为了使得加权最小二乘的结果更加接近最小二乘法,还可以采用递推算法<sup>[11]</sup>。

### 3.1.4 校验与评估

对于有先验知识的系统,比对其被控对象频响曲线,可以判断当前测试效果是否满足要求,或者通过理论值以及实测值之间的差异判断当前的拟合效果。通过频响曲线获得被测系统的带宽、幅值裕量和相位裕量等,以及拟合后系统的零极点分布,可以为控制系统设计提供所需信息<sup>[12-13]</sup>。

### 3.2 代理层软件

代理层软件采用 eMbedded Visual C++4.0 开发工具编写,运行环境为 PowerPC 上的 WinCE 5.0 嵌入式系统。代理层软件是应用层和驱动层的中间枢纽,由于光电跟踪系统原有的代理层软件功能已经非常完善并能够满足虚拟仪器的基本要求,因此只需要在双方各自接口协议上增加额外的定义,就能够实现此虚拟仪器所需的功能。

### 3.3 驱动层软件

驱动层采用 Texas 2000 DSP 为核心处理模块,并结合 CPLD 进行电机驱动以及数字逻辑处理,通过 CPCI 接口连接到代理层。增加了虚拟仪器模块后驱动层软件的程序流程图如图 3 所示,其中的数字 1 到 5 代表驱动层软件的 5 种工作模式,加黑的模块则是虚拟仪器运行时驱动层软件所处的工作模式。由于原有 DSP 系统采用了模块化设计,因此只需要添加一个新的虚拟仪器工作模式,同时对双口交互的接口协议进行一定修改就能够实现其虚拟仪器功能。

## 4 实验与结果

为了验证虚拟动态信号分析仪器的性能,选择光电跟踪系统的垂直轴速度回路和电流回路进行了实验。

### 4.1 电流回路

光电跟踪系统引入电流回路可以有效抑制力矩波动的影响,表 1 给出了虚拟仪器测试电流开

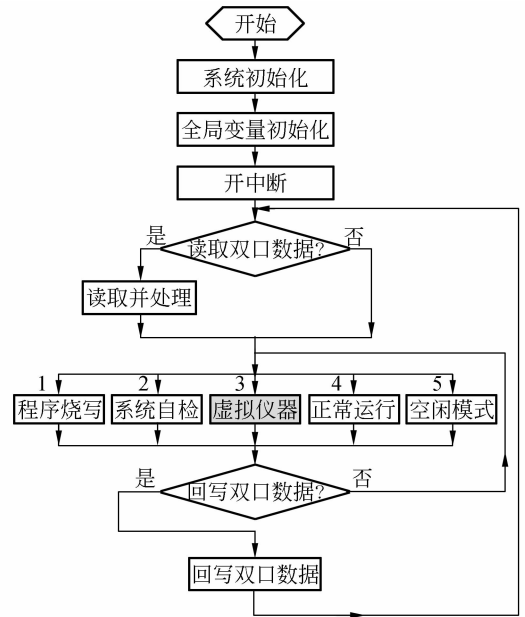


图 3 驱动层软件流程图

Fig. 3 Flow diagram of driver layer software

闭环回路(校正前后)特性的驱动参数。

表 1 电流回路测试驱动参数

Tab. 1 Parameters of current loop test

	起始频率 (Hz)	停止频率 (Hz)	驱动 幅值	扫频点	扫频 方式
开环	10	200	13	300	线性
闭环	10	300	3	300	线性

图 4 给出了电流开环回路的频响特性,拟合

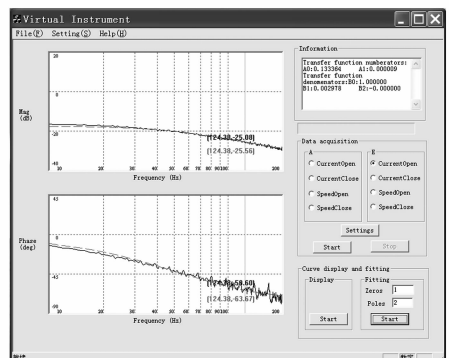


图 4 电流开环回路频响特性图(实线:原始曲线;虚线:拟合曲线)

Fig. 4 Frequency response of current open-loop (solid line: primitive curve; dash line: fitted curve)

得到其传递函数为：

$$G_{co}(s) = \frac{0.133\ 364 + 0.000\ 009s}{1 + 0.002\ 978s} \quad (6)$$

校正过后的光电跟踪系统电流闭环回路频响特性如图 5 所示,其传递函数为

$$G_{cc}(s) = \frac{1.042\ 371 - 0.000\ 266s}{1 + 0.000\ 58s} \quad (7)$$

其带宽为 266.05 Hz,完全满足系统设计的要求,且系统是稳定的。

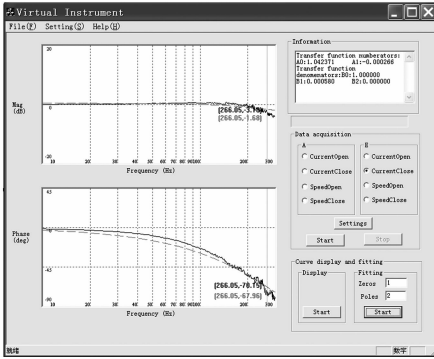


图 5 电流闭环回路频响特性图(实线:原始曲线;虚线:拟合曲线)

Fig. 5 Frequency response of current closed loop (solid line; primitive curve; dash line; fitted curve)

### 4.2 速度回路

表 2 给出了虚拟仪器测试速度开闭环回路(校正前后)特性的驱动参数。

表 2 速度回路测试驱动参数

Tab.2 Parameters of speed loop test

	起始频率 (Hz)	停止频率 (Hz)	驱动 幅值	扫频点	扫频 方式
开环	1	40	3	100	线性
闭环	1	40	1	100	线性

图 6 给出了光电跟踪控制系统速度开环频响特性,可以发现速度开环的幅频特性接近于一个积分环节,但是相位特性并不是始终保持在一 90°,因此拟合得到其传递函数为:

$$G_{so}(s) = \frac{0.104\ 046 - 0.000\ 29s + 0.000\ 001s^2}{1 + 0.093\ 505s + 0.000\ 17s^2 - 0.000\ 002s^3} \quad (8)$$

速度闭环回路的频响特性如图 7 所示,其响

应带宽为 20.3 Hz,谐振峰值基本不存在,校正后系统是传递函数为:

$$G_{sc}(s) = \frac{0.832\ 726}{1 + 0.012\ 006s + 0.000\ 124s^2} \quad (9)$$

式(9)说明速度回路系统是一个二阶振荡环节,且自然频率和阻尼系数均满足设计要求。

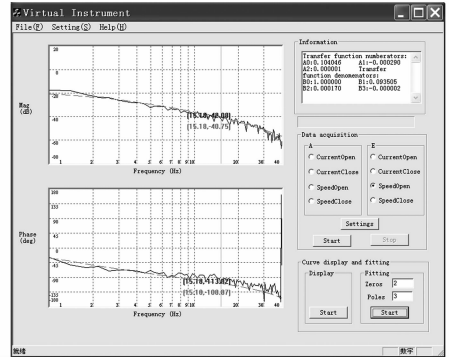


图 6 速度开环回路频响特性图(实线:原始曲线;虚线:拟合曲线)

Fig. 6 Frequency response of speed open-loop (solid line; primitive curve; dash line; fitted curve)

图 7 中相频特性曲线中,当相位超过了一 180°以后,其曲线有一个突变,即从 -180°变为了 +180°,这是因为在程序设计过程中,因为考虑到设计人员所关心的被测对象的频响曲线部分都是稳定的,且截止频率通常会小于系统趋向不稳定时的频率,因此限制了其范围在 ±180°之间。

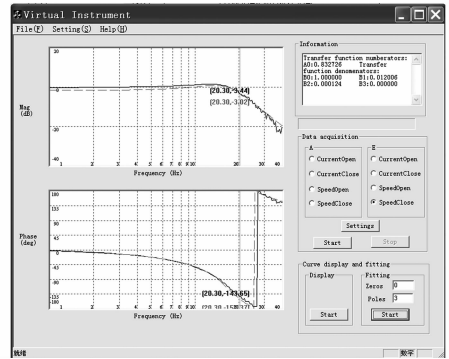


图 7 速度闭环回路频响特性图(实线:原始曲线;虚线:拟合曲线)

Fig. 7 Frequency response of speed closed loop (solid line; primitive curve; dash line; fitted curve)

从图4到图7中可以看出,频响曲线的高频拟合效果没有低频阶段理想,这和高频部分的信号驱动不够充分有关,可以通过选择对数扫频模式或者单独对高频部分单独测试的方法进行解决。

## 5 结 论

本文根据光电跟踪系统对设计工具要求精

度高、速度快的要求,提出了嵌入式虚拟动态信号分析仪的设计方法,并介绍了嵌入式虚拟动态信号分析仪的结构和工作原理。研究了虚拟仪器中的三层软件设计,特别是基于系统辨识技术的应用层软件。实验结果证明:电流回路带宽为266.05 Hz,速度回路带宽为20.3 Hz,和设计指标完全一致。

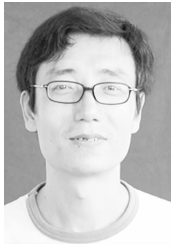
## 参考文献:

- [1] 肖影,金龙旭.方位角测量跟踪系统设计及实验[J]. 光学精密工程,2007,15(5):741-745.  
XIAO Y, JIN L X. Design and experiment of tracking and detecting system for azimuth[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(5):741-745. (in Chinese)
- [2] 杨乐平,李海涛,肖凯,等.虚拟仪器技术概论[M]. 北京:电子工业出版社,2004.  
YANG L P, LI H T, XIAO K, et al.. *Virtual Instrument Technology Conspectus*[M]. Beijing: Electronic Industrial Press,2004. (in Chinese)
- [3] ZADEH L A. From circuit theory to system theory [J]. *Proceedings of the IRE*, 1962, 50 (5): 856-865.
- [4] BANOS A, GOMEZ F. Parametric identification of transfer functions from frequency response data [J]. *Computing & Control Engineering*, 1995, 6 (3):137-144.
- [5] BILSKI P, WINIECKI W. Virtual spectrum analyzer based on data acquisition card[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2002, 51(1):82-87.
- [6] 张智永,范大鹏,范世驹.光电稳定跟踪装置的控制系统设计[J]. 光学精密工程,2006,14(4):681-688.  
ZHANG ZH Y, FAN D P, FAN SH X. Servo system design for E-O stabilization and tracking devices [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (4): 681-688. (in Chinese)
- [7] MITRA S K. *Digital Signal Processing—A Computer-based Approach* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [8] BATEMAN A, PATERSON-STEPHENS I. *The DSP Handbook: Algorithm, Applications and Design Techniques* [M]. Beijing: China Machine Press,2003.
- [9] LJUNG L. *System Identification: Theory for the User*[M]. New York:Prentice Hall,1999.
- [10] LEVY E C. Complex-curve fitting [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1959, AC-4: 37-44.
- [11] SANATHANAN C K, KOERNER J. Transfer function synthesis as a ratio of two complex polynomials [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1963, AC-9:56-58.
- [12] FUH C, TSAI H. Adaptive parameter identification of servo control systems with noise and high-frequency uncertainties [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007,21(3):1437-1451.
- [13] 李岷,马军,周兴义.机载光电稳定平台检测技术的研究[J]. 光学精密工程,2006,14(5):847-852.  
LI M, MA J, ZHOU X Y. Study of measurement technique on airborne photoelectric stabilized platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5):847-852. (in Chinese)

## 作者简介:



熊 皓(1980—),男,重庆人,博士,助理研究员,分别于 2002 年、2005 年于重庆大学获学士、硕士学位,2008 年于中科院光电技术研究所获博士学位,现在中国科学院光电技术研究所从事光电跟踪系统伺服控制、自适应控制等方面的研究。E-mail: xiongai@hotmail.com



范永坤(1970—),男,辽宁锦州人,副研究员,博士研究生,1993 年于西安公路学院获学士学位,1999 年于西安公路交通大学获硕士学位,现在中科院光电技术研究所从事光电探测技术的研究。E-mail: fangle007@yahoo.com.cn



吴钦章(1955—),男,山东新泰人,研究员,博士生导师,主要从事光电跟踪测量系统的自动识别,控制技术及软件工程的研究。

(本栏目编辑:严 寒)

## ●下期预告

## Ku 波段 MEMS 微波功率耦合器设计

朱秋耀,廖小平

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室,江苏 南京 210096)

现有的微波功率测量都基于热电偶和二极管等终端器件,功率信号在被检测后无法利用。本文对一个基于微机电(MEMS)射频(RF)并联开关的微波功率耦合器在 Ku 波段(12.4~18 GHz)应用下的设计做了讨论,包括等效电路、共面波导(CPW)匹配设计和结构仿真。这种耦合器是 MEMS 微波功率传感器的核心,它利用 MEMS 膜桥耦合 CPW 上的微波功率信号,大部分功率信号被检测后都能传至下级电路做进一步处理。为了减小反射损耗和获得宽频带响应,本文提出了两种优化方法,即凹槽调谐结构设计和补偿电容设计,经过优化设计后的 Ku 波段 MEMS 微波功率耦合器的回波损耗( $S_{11}$ )和插入损耗( $S_{21}$ )在中心频率 15.2 GHz 处分别达到了 $-42.90$  dB 和 $-0.15$  dB,显示出耦合器的高隔离度和低损耗。同时在 Ku 波段范围内,上述参数同中心频率点处的偏差分别为 $\pm 6.41$  dB 和 $\pm 0.04$  dB,显示出其宽带特性。